

*Д.В.БРЕСЛАВСКИЙ*, докт.техн.наук; *О.А.ТАТАРИНОВА*;  
*О.Н.ХОРОШИЛОВ*, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

## **УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ БРОНЗОВЫХ СПЛАВОВ**

Статтю призначено опису методики отримання рівнянь стану статичної й циклічної повзучості та накопичення прихованої пошкоджуваності для бронз, що знаходяться при високих температурах (0,9 – 0,95 температури плавлення). Застосування методики демонструється на прикладі рівнянь стану для двох сплавів, для яких порівнюються експериментально визначені та розрахункові данні. Отримані рівняння застосовані для спрощеного аналізу рівня деформованості та пошкоджуваності бронзових заготовів у технологічному процесі безперервного лиття.

The paper describes the technique for derivation of static and cyclic creep-damage constitutive equations for bronze alloys under the high temperatures (0,9 – 0,95 of melting temperatures). The use of the developed technique is demonstrated on the examples for two alloys, for which the experimentally and numerically determined values are compared. The derived state equations were used for simplified analysis of the strain and damage levels in bronze billets in the technological process of continuous casting.

**1. Актуальность темы.** В настоящее время процессы непрерывного литья получают все большее распространение. Процесс получения металлических заготовок в этом случае имеет ряд особенностей, связанных с тем, что материал при движении заготовки из печи постепенно переходит от жидкого состояния к твердому. В этом процессе очень важным является обеспечение минимального уровня деформированности и поврежденности получаемых заготовок. Многие процессы построены на циклическом приложении нагрузок, обеспечивающих заданную программу выдачи заготовок из печи до их полного отвердевания. В связи с этим адекватное описание циклической ползучести и связанного с ней накопления поврежденности в материале заготовок для проектирования с помощью эффективных уравнений состояния технологических процессов непрерывного литья является актуальной и практически важной задачей.

**2. Получение констант с помощью экспериментальных данных.** Для получения констант, входящих в уравнения ползучести и повреждаемости для бронз при высоких температурах, в лаборатории кафедры динамики и прочности машин ХПИ был проведен цикл экспериментальных исследований одноосных образцов.

Стандартная испытательная машина АИМА-5-2, рассчитанная на относительно низкие температуры испытаний конструкционных материалов – (0,37 – 0,71)  $T_L$  и, соответственно, низкие скорости деформации образца, была подвергнута существенной модернизации [1, 2], что позволило обеспечить перемещение образца с максимально возможной скоростью, обусловленной

скоростью его свободной деформации.

Испытывались стандартные образцы длиной 200 мм с базой длиной 100 мм и диаметром 10 мм, что соответствует ГОСТ 3248-81, ГОСТ 26007-83. Образцы устанавливались в специальное устройство по оси действия нагрузки, позволяющее производить их испытания в температурном интервале  $(0,9 - 0,95) T_{пл}$

Для каждого сплава при фиксированных значениях температуры и напряжения испытывалось 3-4 образца. С помощью статистических методов экспериментальные данные обрабатывались, после чего были построены графики для зависимости деформации ползучести от времени и кривые длительной прочности.

Для описания экспериментально полученных кривых высокотемпературной ползучести и разрушения использованы определяющие уравнения типа Бейли-Нортон и Работнова-Качанова:

$$\dot{\epsilon} = B \frac{\sigma^n}{(1 - \omega)^m}; \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma^n}{(1 - \omega)^m}; \quad \omega(0) = 0; \quad \omega(t_*) = \omega, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – деформация ползучести,  $\omega$  – параметр повреждаемости;  $B$ ,  $D$ ,  $n$ ,  $m$  – константы, определяемые по экспериментальным данным о ползучести и разрушении материала при заданной температуре.

Кратко изложим методику определения констант в законе ползучести (1) и кинетическом уравнении для параметра повреждаемости (2):

1. Используются наборы опытных результатов, полученных при заданной температуре и разных напряжениях. Например, для определения 4-х констант  $B$ ,  $D$ ,  $n$  и  $m$ , входящих в определяющие соотношения (1, 2), необходимо иметь наборы опытов на ползучесть образцов вплоть до разрушения при трех различных нагрузках. Также для определения констант, входящих в уравнение (2), возможно использование кривых длительной прочности. Два опыта необходимо для получения констант, а третий – для проверки достоверности найденных констант.
2. Для нахождения материальных констант  $B$ ,  $n$  в законе ползучести используются два значения деформации в определенные моменты времени из кривых ползучести при двух разных напряжениях. Решая дифференциальное уравнение (1) и подставляя в него указанные значения, определяются константы  $B$  и  $n$ .
3. Для нахождения констант в кинетическом уравнении для параметра повреждаемости используются кривые длительной прочности. Решая совместно уравнения (1, 2) и подставляя значение времени до разрушения и разрушающей деформации при двух разных напряжениях,

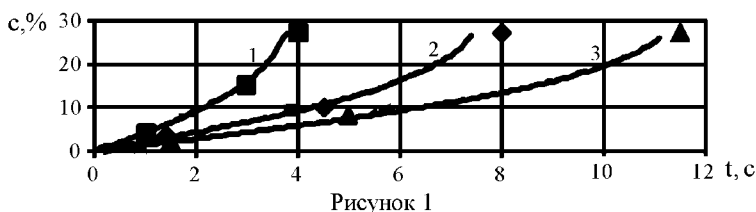
определяются константы  $D$  и  $m$ .

- Используя найденные константы, строятся расчетные кривые зависимости деформации и параметра повреждаемости от времени, кривые длительной прочности по уравнениям состояния (1, 2) для трех значений напряжений. Производится сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных. Если относительная погрешность не превышает заданного значения (например, 10 %), то тогда найденные материальные константы считаются верными.

Описанной методикой воспользуемся для определения констант в уравнениях (1, 2). Рассматриваем образцы из бронз марок О8Н4Ц2 и О10Ц2. Путем обработки экспериментальных данных о ползучести вплоть до разрушения образцов из бронз марок О8Н4Ц2 и О10Ц2, полученных в лаборатории прочности кафедры «Динамика и прочность машин» НТУ «ХПИ» при температуре  $T = 930^\circ\text{C}$ , установлены значения постоянных для двух марок бронзы.

Для бронзы марки О8Н4Ц2:  $n = 3,265$ ;  $m = 0,25$ ;  $B = 3,548 \cdot 10^{-3} (\text{МПа})^{-n}/\text{с}$ ;  $D = 0,018 (\text{МПа})^{-n}/\text{с}$ . Для бронзы марки О10Ц2:  $n = 3,06$ ;  $m = 0,143$ ;  $B = 3,615 \cdot 10^{-3} (\text{МПа})^{-n}/\text{с}$ ;  $D = 9,037 \cdot 10^{-3} (\text{МПа})^{-n}/\text{с}$ .

На рис. 1-2 представлено сравнение экспериментальных данных (точки) с расчетными кривыми, полученными при найденных материальных постоянных (сплошная линия) для трех разных значений напряжений. Кривая 1 соответствует напряжению  $\sigma = 2,1 \text{ МПа}$ , кривая 2 –  $\sigma = 1,7 \text{ МПа}$ , кривая 3 –  $\sigma = 1,5 \text{ МПа}$ . Рис. 1 отвечает данным для образцов из бронзы О8Н4Ц2, рис. 2 – О10Ц2. Анализ и сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод об удовлетворительной точности найденных констант.



**3. Циклическая ползучесть.** Условия протекания различных технологических процессов, нагружение элементов машиностроительных конструкций часто характеризуются циклическим характером изменения напряжений.

Экспериментальное получение законов циклического деформирования и разрушения при одноосном и сложном напряженном состоянии является более сложной задачей по сравнению с чисто статическими опытами. В связи с этим возникает задача теоретического описания кривых циклической ползучести вплоть до разрушения с использованием результатов опытов, проведенных при статической нагрузке. Решение этой задачи для случая многоциклового нагружения приведено в работе [2], для малоциклового – в [3].

В связи с тем, что исследования высокотемпературной кратковременной ползучести бронзовых образцов проводились для экспериментального обоснования режимов движения заготовок в технологическом процессе непрерывного литья, разработанную в работе [3] методику получения определяющих уравнений применим для описания малоцикловой ползучести.

Рассмотрим циклическое нагружение при одновременном действии постоянного напряжения  $\sigma_0$  и медленно меняющегося за период рабочего цикла  $T$  напряжения  $\sigma_1$ . В работе используется вид цикла, в котором образец в течение 4 с. находится под нагрузкой и в течение 12 с. выдерживается без нагрузки.

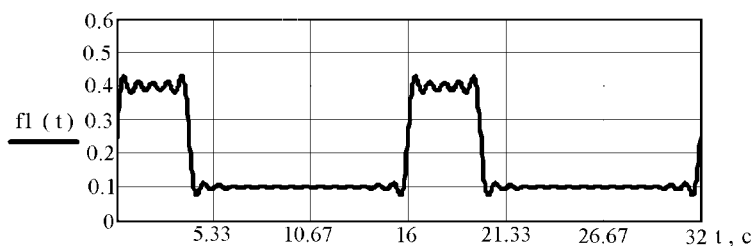


Рисунок 3

Представим циклическое напряжение в виде ряда Фурье:

$$\sigma_1 = \sigma_M \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\sin(\pi k/2)}{\pi k} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) - \frac{\cos(\pi k/2) - 1}{\pi k} \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) \right) \right) \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_M$  – амплитудное значение напряжения, МПа.

Ограничимся случаем 20 гармоник. Полученное представление (рис. 3) вполне удовлетворительно описывает график изменения полного напряжения.

Рассмотрим уравнения состояния ползучести при простом напряженном состоянии, принимая закон статической ползучести с повреждаемостью в виде (1,2).

Для описания процессов ползучести и связанной с ней повреждаемости применим методику асимптотических разложений и осреднения на периоде, предложенную в работе [3]. Асимптотические разложения по малому параметру  $\mu = T/t_*$  в двух масштабах времени – медленного  $t$ , и быстрого  $\xi = \tau/T$ ,  $\tau = t/\mu$ , принимаем в виде

$$c = c^0(t) + \mu c^1(\xi), \quad (4)$$

$$\omega = \omega^0(t) + \mu \omega^1(\xi), \quad (5)$$

где  $c^0(t)$ ,  $\omega^0(t)$ ,  $c^1(\xi)$ ,  $\omega^1(\xi)$  – функции, отвечающие основному процессу ползучести и повреждаемости в масштабе медленно изменяющегося времени и периодически повторяющемуся процессу в масштабе быстрого времени  $\xi$ .

Используя технику асимптотических разложений для уравнений (1,2) и соотношения (4,5), после осреднения на периоде рабочего цикла  $T$  получаем определяющие уравнения циклической ползучести:

$$\dot{c}^0 = B g_n(M) \frac{(\sigma_0)^n}{(1 - \omega^0)^m}, \quad (6)$$

$$\dot{\omega}^0 = D g_n(M) \frac{(\sigma_0)^n}{(1 - \omega^0)^m}, \quad \omega^0(0) = 0, \quad \omega^0(t_*) = \omega^*, \quad (7)$$

где

$$g_n(M) = \int_0^1 \left( 1 + M \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\sin(\pi k/2)}{\pi k} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) - \frac{\cos(\pi k/2) - 1}{\pi k} \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) \right) \right) \right)^n d\xi$$

– функции асимметрии цикла напряжений;  $M = \sigma_M / \sigma_0$ .

Полученные определяющие уравнения использованы для описания кривых циклической ползучести. На рис. 4, 5 представлены графики зависимости от времени деформации ползучести, а на рис. 6 – параметра повреждаемости.

На рис. 4 кривая 1 соответствует статическому нагружению при  $\sigma_0 = 1,5$  МПа; кривая 2 – совместному действию статического нагружения при  $\sigma_0 = 1,5$  МПа и наложенной на него медленно изменяющейся составляющей по закону (3) при  $\sigma_0 = 0,75$  МПа; кривая 3 – совместному действию статического нагружения при  $\sigma_0 = 0,75$  МПа и наложенной на него медленно изменяющейся составляющей по закону (3) при  $\sigma_0 = 0,75$  МПа. Отметим существенное (в 2,4 раза) ускорение ползучести по сравнению со статическим нагружением (кривые 1 и 2). На рис. 5 и 6 кривая 1 соответствует совместному действию статического нагружения при  $\sigma_0 = 0,002$  МПа и наложенной на него медленно изменяющейся составляющей по закону (3) при  $\sigma_0 = 0,8$  Па; кривая 2 – совместному действию статического нагружения при  $\sigma_0 = 0,002$  МПа и наложенной на него медленно изменяющейся составляющей по закону (3) при  $\sigma_0 = 0,4$  МПа. Значения напряжений выбраны из предварительного упрощенного анализа напряжений в заготовке, причем амплитуда циклического нагружения выбиралась из интервала возможных значений сил вытягивания заготовки. Для случаев, описанных кривыми 1 и 2 – это 200 и 100 Н соответственно. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, показывает, что за требуемое время технологического процесса 160 с. при нагрузке 200 Н происходит разрушение образца, а при 100 Н уровень поврежденности составляет 0,07. Следовательно, такие значения циклически меняющейся нагрузки являются недопустимыми. Далее расчеты были проведены для других значений силы вы-

тягивания.

Для случая, когда эта сила оказывается равной 20Н, уровень поврежденности в заготовке оказывается допустимым и составляет 0,0004.

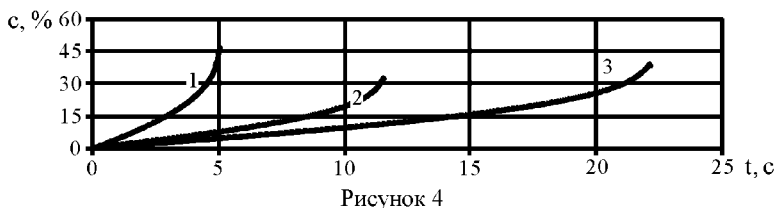


Рисунок 4

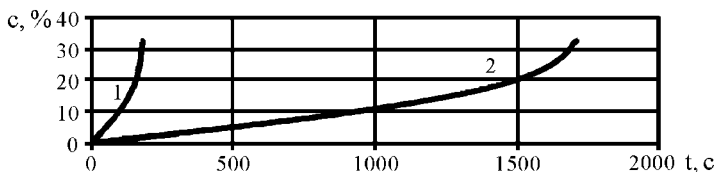


Рисунок 5



Рисунок 6

**4. Выводы.** На основе разработанной методики, использующей асимптотические разложения основных неизвестных с последующим осреднением на периоде рабочего цикла, получены определяющие уравнения циклической ползучести и связанного с ней накопления повреждаемости. Выполнены расчеты, по которым построены кривые циклической ползучести вплоть до разрушения. Для процессов непрерывного литья по упрощенной методике проведены предварительные оценочные расчеты циклического деформирования заготовок от действия силы вытягивания. Полученные критические значения силы вытягивания должны быть уточнены в дальнейшем по результатам расчетов при сложном напряженном состоянии, которое реализуется в заготовке.

**Список литературы:** 1. О.И.Хорошилов Прочность медных сплавов в температурном интервале кристаллизации // Литейное производство. – 1999. – № 12. – С. 22-23. 2. Breslavsky D., Morachkovsky O. New experiments in dynamic creep // Proc. 15th Symp. on Experimental Mechanics of Solids. – Warsaw: Warsaw Techn. Univ. – 1992. – P.29-31. 3. Бреславский Д.В., Морачковский О.К., Узарова О.А. Метод асимптотических разложений в задачах мало- и многоциклового ползучести материалов // Вісник ІТТУ «ХП». – Харків: ІТТУ «ХП». – № 19. – 2004. – С. 23-32.

Поступила в редколлегию 8.11.2007